

ЛОКАЛЬНОЕ УДАРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ МЕТЕОРИТОВ

Хисина Н.Р.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), г. Москва,
khisina@geokhi.ru

Ударные эффекты в метеоритах являются результатом столкновений космических тел. Возникающие при столкновениях ударные волны генерируют в веществе высокие давления ($P < 100$ GPa) и температуры ($T < 2000$ K). Это приводит к различным ударным эффектам в твердом теле (деформации, брекчирование, аморфизация и перекристаллизация с образованием новых минералов, в том числе минералов высокого давления). Наиболее значительный эффект ударная волна производит на границе разнородных сред, имеющих разное ударное сопротивление. В этом случае происходит диссипация энергии ударной волны с переходом части кинетической энергии в тепловую энергию, которая аккумулируется преимущественно в менее плотной среде [Heider and Kenkmann, 2003]. Наличие порового пространства на границе двух разнородных сред усиливает ударный эффект, в результате которого образуются участки локального плавления – ударные прожилки и «расплавные карманы».

Ударные эффекты, обусловленные наличием порового пространства на границах разнородных сред, отчетливо проявлены в метеорите Эльга, который относится к дифференцированному типу железных метеоритов группы ПЕ с силикатными включениями нескольких литологических типов. Основные модели образования Эльги предполагают смешение металлического и силикатного расплавов на поверхности родительского тела метеорита в результате крупного импактного события. Минералогия силикатных включений в Эльге описана в ряде работ [Кваша и др., 1974; Пляшкевич, 1962; Osadchii et al., 1981; Теплякова и др., 2018].

В краевых частях метеорита Эльга выявлены специфические эффекты, обусловленные многократными ударными воздействиями [Хисина и др., 2017]: (I) стратифицированные шрейберзит-оксидные каймы вдоль границ силиката и металла, образованные в результате **раннего** ударного события (Рис. 1); (II) расплавные карманы в силикатных включениях (Рис. 2); (III) фрагментация и брекчирование отдельных участков кайм. Образование ударно-преобразованных зон (II) и (III) происходило с участием вещества кайм и, соответственно, относится к более **позднему** ударному событию. Полученные данные демонстри-

руют следующие общие особенности процесса ударного плавления при наличии порового пространства (пустоты, микротрещины) на границе раздела двух веществ, имеющих разное по величине ударное сопротивление (импеданс). (1) Образование смешанного расплава с участием компонентов контактирующих веществ с разной величиной ударного сопротивления. (2) Явления жидкостной несмесимости в образующихся расплавных карманах. (3) Механическое перемещение ударной волной неизмененных фрагментов более плотного вещества («нодулей») в расплавленные зоны менее плотного вещества с образованием смешанных («solid-melt») расплавных карманов. (4) Мобилизация летучих и их концентрация в поровом пространстве зон ударного плавления. (5) Эффекты детонации газа в зонах ударного преобразования. (6) Реакции самоокисления – самовосстановления в результате диссоциации летучих в ударных расплавных зонах. (7) неоднородное распределение давления и температуры в зонах ударного плавления.

Фосфид-оксидные каймы на границах силикатных включений и вмещающего металла. Вдоль границ силикатных включений и вмещающего металла наблюдаются каймы, образованные шрейберзитом (Fe,Ni_3) и Fe,Ni -оксидами. Подобные каймы в железных метеоритах до сих пор не были описаны, хотя чисто шрейберзитовые каймы наблюдались в ряде метеоритов. Sch-оксидные каймы вокруг силикатных включений в Эльге стратифицированы: Sch образует слой на контакте с силикатом, оксидная кайма расположена между Sch и вмещающим металлом и характеризуется наличием SiO_2 прослойки (Рис. 1).

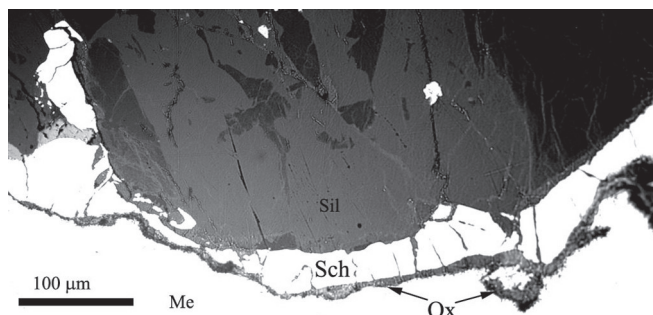


Рис. 1. Стратифицированная шрейберзит-оксидная кайма на границе силикатного включения (Sil) и металла (Me). Sch – шрейберзит, Ox – оксид. Оптическое изображение, отраженный свет

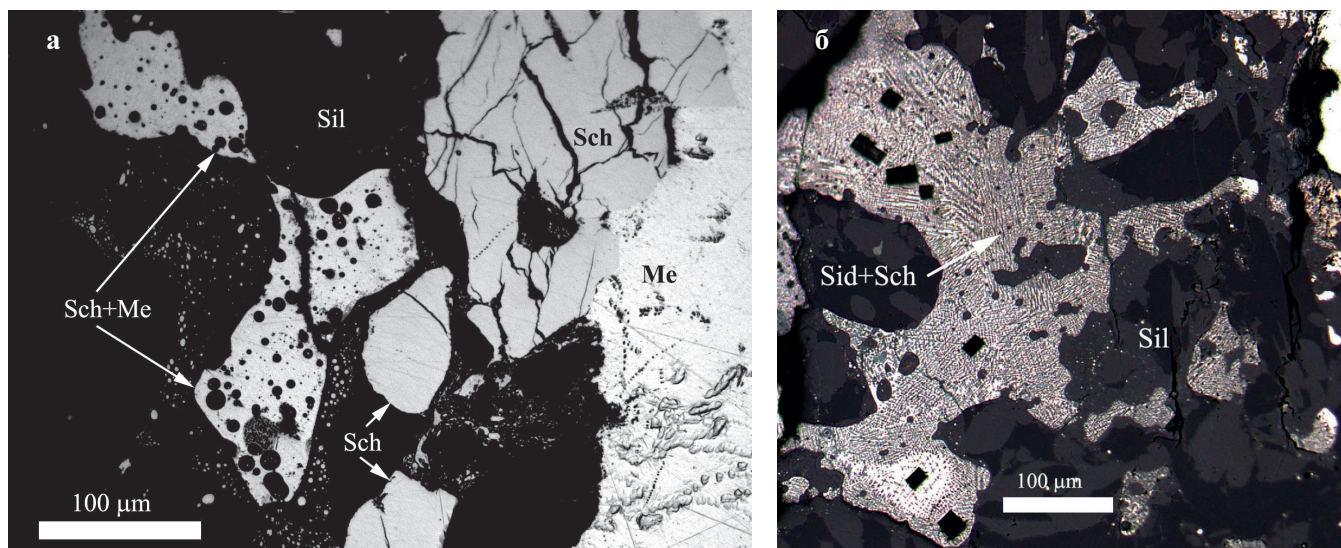


Рис. 2. Расплавные карманы в силикатном включении. (а) Расплавный силикатный карман с перемещенными фрагментами каймы (шрейберзит и шрейберзит-троилитовая эвтектика). Сыпь шрейберзит-троилитовых глобул маркирует границы высокотемпературной области силикатного расплавленного кармана. Нодулы шрейберзит-троилитового состава содержат глобулы силикатного стекла. (б) Расплавный фосфид-карбонат-оксидный карман плавления внутри силикатного включения. Расплавный карман имеет необычную конфигурацию в форме «щупалец» и микроструктуру, проявленную закономерной сеткой выделений в фосфидной матрице

В кайме присутствуют округлые тонкозернистые агрегаты троилита FeS и пятнистые выделения сидерита FeCO_3 . Стратифицированная кайма является продуктом ударного плавления на границе двух сред с различными упругими свойствами и плотностью – металла и силиката. Ударный расплав был образован при смешении селективной экструзии расплавов FeO и SiO_2 , поступавших из силикатного включения на границу с металлом, и пограничным слоем металла. Процесс ударного плавления сопровождался мобилизацией летучих из силикатного включения (P_2O_5) и вмещающего металла (S, P, C), их концентрацией в поровом пространстве, диссоциацией P_2O_5 и последующими реакциями восстановления-окисления с образованием сидерита и Fe, Ni оксидов. Зональность каймы и стратификация вещества при затвердевании и кристаллизации локальных ударных расплавов обусловлены температурным градиентом на границе высокотемпературного силикатного расплава и относительно холодного металла (эффект диссипации энергии при прохождении ударной волны через границу различающихся по плотности сред).

Расплавные карманы в силикатных включениях. Более позднее ударное событие сопровождалось образованием локальных ударных расплавов (карманов плавления) в силикатных включениях с перемещением в карманы плавления порций вещества прилегающей каймы. Смешанные расплавы в силикатном включении наблюдаются или вдоль трещин, имеющих выход на границу с каймой, или в приграничных областях силикатного включения (рис. 2). Расплавные

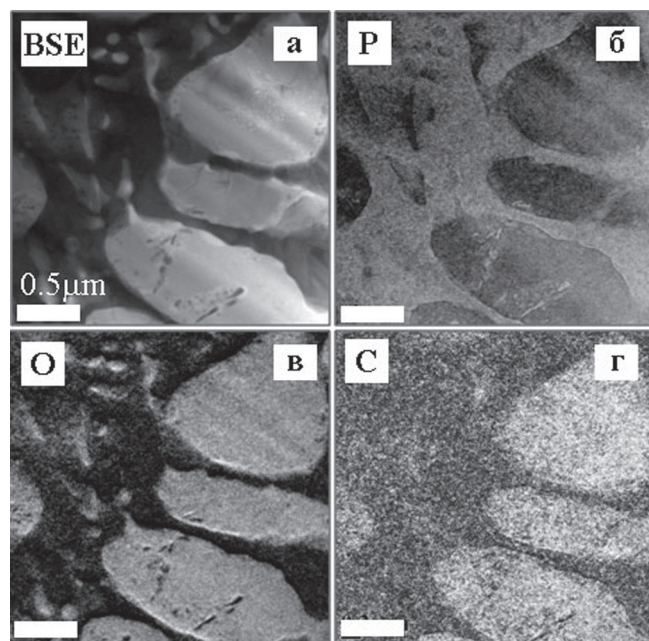


Рис. 3. Микроструктура участков расплавленного фосфид-карбонат-оксидный кармана, образованная выделениями сидерита в шрейберзитовой матрице. Элементное картирование углерода методом TEM

карманы демонстрируют явления ликвации (жидкостной несмесимости). Признаком ликвации являются многочисленные микроглобулы шрейберзита, которые или равномерно распределены в объеме силикатной матрицы, или приурочены к границам расплавленного кармана (рис. 2а). Характерно присутствие в расплавных карманах шрейберзит-троилитовых нодул, перемещенных ударной волной от границы силикатного включения с металлом (рис. 2а). Ликвационная

микроструктура в необычном многокомпонентном фосфид-карбонат-оксидном расплавленном кармане, не содержащем силикатное стекло (рис. 2б), образована выделениями сидерита в фосфидной (шрейберзитовой) матрице (рис. 3).

Углерод-содержащие фазы в зонах ударного преобразования. При изучении зон ударного преобразования в Эльге в составе продуктов ударного метаморфизма был идентифицирован сидерит [Теплякова и др., 2012; Хисина и др., 2017]. Сидерит приурочен к зонам ударного преобразования с локализацией в оксидной кайме, в зоне брекчирования каймы, а также в расплавленном фосфид-карбонат-оксидном кармане внутри силикатного включения. Происхождение сидерита в железных метеоритах обычно приписывается земному изменению. Однако нахождение сидерита в форме сегрегированной фазы в ликвидированном фосфид-карбонатном расплаве (рис. 3) доказывает внеземное происхождение сидерита в Эльге [Хисина и др., 2017]. Другим аргументом в пользу внеземного происхождения сидерита является обнаружение в расплавленном кармане методом ТЕМ (EELS спектроскопия) сидерита в ассоциации с высокобарным Fe^{3+} -карбонатом [Khisina and Wirth, 2017]. EELS спектры Fe^{3+} -карбоната в Эльге полностью совпадают с EELS спектрами высокобарной фазы $(\text{Fe}^{3+})_4(\text{CO}_4)_3$, которая была синтезирована экспериментально при давлениях >50 ГПа [Boulard et al., 2012]. До настоящего времени высокобарные карбонаты в природе не обнаружены; ударно-образованный Fe^{3+} -карбонат в метеорите Эльга является первой находкой высокобарного Fe^{3+} -карбоната в природном внеземном веществе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кваша Л.Г., Ю.Г. Лаврентьев, Н.В. Соболев. (1974) О силикатных включениях и признаках ударного метаморфизма в октаэдрите Эльга. Метеоритика, 33, 143-147.
2. Пляшкевич Л.Н. (1962) Некоторые данные о составе и структуре железного метеорита Эльга. Метеоритика, 22, 51-60.
3. Теплякова С.Н., Н.Р. Хисина, В.В. Артемов, А.Л. Васильев. (2012) Наноминералогия дендритных включений в железном метеорите Эльга. Записки Рос. Мин. Общества, 141, 2, 42-52.
4. Теплякова С.Н., К.А. Лоренц, М.А. Иванова, Н.Н. Кононкова, М.О. Аносова, К.М. Рязанцев, Ю.А. Костицин. (2018) Минералогия силикатных включений в железном метеорите группы IIE Эльга. Геохимия, 1, 1-25.
5. Хисина Н.Р., С.Н. Теплякова, В.Г. Сенин, А.А. Ширяев, А.А.Аверин. (2017) Углеродсодержащие фазы в зонах ударного плавления метеорита Эльга. Геохимия, 4, 1-15.
6. Boulard E., N. Menguy, A.L. Auzende, K. Benzerara, H. Bureau, D. Antonangeli, A. Corgne, G. Morard, J. Siebert, J.P. Perrillat, F. Guyot, G. Fiquet. Experimental investigation of the stability of Fe-rich carbonates in the lower mantle. (2012) J. Geophysical Res., 117, B02208.
7. Heider N., T. Kekkann. (2003) Numerical simulation of temperature effects at fissures due to shock loading. Meteor. Planet. Sci., 38, 10, 1451-1460.
8. Khisina N.R., R. Wirth. (2017) Shock-produced siderite in IIE iron meteorite Elga. Abstracts 49th LPSC, #1068.
9. Osadchii Eu.G., G.V. Baryshnikova, G.V. Novikov. (1981) The Elga meteorite: silicate inclusions and shock metamorphism. 12th Lunar Planet. Sci., 1049-1068.